'01 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 섭식경로를 통한 인체노출 해석을 위한 ECOREA-II 코드 개발

# Development of a ECOREA-II Code for Human Exposures from Radionuclides through Food Chain

유동한, 최용호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

**국문요약**

원자력시설에 사고가 발생하여 대기로 방출된 방사능은 두가지 주요경로를 통해 인체노출이 일어난다. 첫째는 대기중의 방사성물질이 호흡이나 피부등을 통해 인체에 직접적인 노출이고 다른 하나는 주변의 토양에 침적하여 인간이 이런 오염된 농작물을 섭취하거나, 오염된 목초로 키운 축산물등을 통한 보다 간접적인 인체노출이다. 본 연구는 이런 보다 간접적인 인체노출을 보다 정량적으로 평가하기 위해서는 토양, 농작물 그리고 축산물등을 통한 방사성물질의 이동경로를 해석하는 코드 개발노력을 보여준다. ECOREA-II 라고 명명된 이 코드는 기존의 여러모델을 바탕으로 하여 국내의 실정에 맞는 모델을 추가하고 보다 편리한 Graphic User Interface (GUI) 을 제공하는 것을 목표로 하고 있다. ECOREA-II코드가 완성되면 원자력시설의 사고시 예상되는 지역의 환경영향 및 농작물, 축산물의 안전성을 확보하는데 중요한 자료를 제공하고 이를 바탕으로 한 식품안전대책 수립시에도 도움이 되리라고 판단된다.

**abstract**

The release of radionuclides from nuclear facilities following an accident into air results in human exposures through two pathways. One is direct human exposures by inhalation or dermal absorption of these radionucles. Another is indirect human exposures through food chain which includes intakes of plant products such as rice, vegetables from contaiminated soil and animal products such as meat, milk and eggs feeded by contaminated grasses or plants on the terrestial surface. This study presents efforts of the development of a computer code for the assessment of the indirect human exposures through such food chains. The purpose of ECOREA-II code is to develop appropriate models suitable for a specific soil condition in Korea based on previous experimental efforts and to provide a more user-friendly environment such as GUI for the use of the code. Therefore, the current code, when more fully developed, is expected to increase the understanding of environmental safety assessment of nuclear facilities following an accident and provide a reasonable regulatory guideline with respect to food safety issues.

## 1. 서 론

원자력시설이나 원자력발전소에서 사고가 발생하여 대기로 방출된 방사능물질은 두가지 주요경로를 통해 인체노출이 일어난다. 첫째는 지역내 대기중에 존재하는 방사성물질이 인체의 호흡이나 피부등을 통해 체내로 흡입되는 직접적인 노출 (Direct Exposures)이고 다른 하나는 방사능물질이 대기로부터 주변의 토양에 침적하고 이러한 토양에서 재배된 오염된 농작물들 (쌀, 보리, 밀, 또는 과일, 채소)을 인간이 섭취하거나, 방사능물질에 오염된 목초등로 키운 축산물 (소, 돼지, 닭등)등이 생산하는 제품들(우유, 고기, 달걀등)을 인간이 섭취함으로써 이루어지는 보다 간접적인 인체노출(Indirect Exposures)이 있을 수 있다. (그림 1 참조)

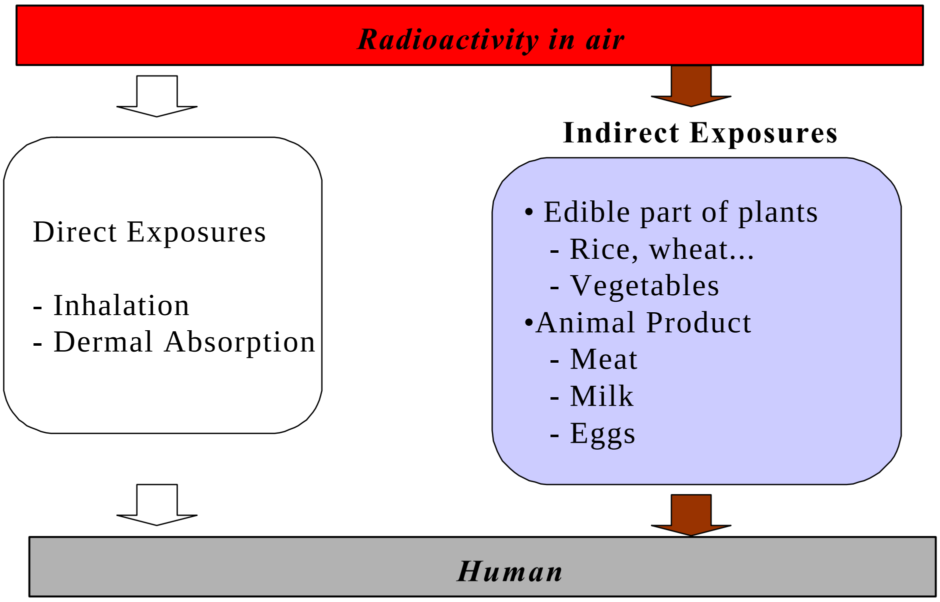



그림 1. 방사능물질의 인체노출 경로

이제까지는 앞서 언급한 직접노출의 평가는 많이 이루어졌었다. 특히, PSA의 경우 level 3에서 이러한 인체노출에 의한 위해도 평가는 확률론적인 방법까지 도입되어 이루어져 왔었다. 그러나, 식품이나 축산품을 통한 방사능물질의 인체노출은 이러한 직접적인 노출에 비해 비교적 평가하기가 어렵고 직접노출에 비해 중요성이 떨어진다는 인식하에 국내에서는 그다지 많은 연구가 수행되지 못한 실정이다. 최근에 들어서 각종 환경오염물질에 의한 인체영향 연구결과에 보듯이 직접적인 인체노출 못지 않게 이러한 섭식경로를 통한 간접적인 인체노출도 상당히 중요하다는 인식을 갖게 되었다. 특히 이러한 섭식경로를 통한 노출은 각 나라마다 매우 독특한 양상을 보이고 있어, 이미 연구가 수행된 미국이나 유럽등지의 평가방법을 그대로 사용하면 국내의 토양에서 재배되는 농작물이나 이를 이용한 축산물에 따른 한국인의 독특한 섭취양상을 충분히 고려하여 평가하기 어렵게 된다.

본 논문은 방사능물질의 섭식경로를 통해 간접적인 인체노출을 보다 정량적으로 평가하기 위해서 국내실정에 맞게 토양, 농작물 그리고 축산물등을 통한 방사성물질의 이동경로를 해석하는 코드, 일명 ECOREA-II, 의 개발에 대한 연구를 보여주려고 한다. 이 코드는 기존의

국내외 존재하는 여러모델을 바탕으로 하여  국내의 실정에 맞는 여러 현상ㅇ에 대한 모델들을 추가하려고 하며,  코드의 사용시 사용자에게 보다 편리한 Graphic User Interface (GUI) 을 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 ECOREA-II코드가 완성되면 국내의 원자력시설에서의 사고시 예상되는 지역의 환경영향 및 재배되는 농작물, 축산물의 안전성을 확보하는데 중요한 자료를 제공하고 이를 바탕으로 한 식품안전대책 수립시에도 도움이 되리라고 판단된다.

## 2. ECOREA-II 코드 모델개발

### 2.1 모델 개발 형태

이러한 섭식경로를 통한 방사성물질의 이동에 대한 연구는 미국의 경우 1960년말부터 시작되었는데 대표적인 모델은 ORNL의 TERMOD[1], 최근의 모델로는 PATHWAY[2]등을 들 수 있다. 반면, 국내의 경우 1980년말부터 이 분야의 연구를 시작하여 ECOREA라는 모델을 개발한 적이 있다[3].  독일의 경우, 1990년 초에 섭식경로를 통한 방사성물질의 중요성을 인식하여 자체적으로 개발된 ECOSYS-87 코드를 활용하고 있다[4].

현재 이러한 모델은 크게 두가지 형태로 구분하여 볼수 있다. 첫째는 TERMOD, PATHWAY, 그리고 ECOREA와 같은 동적 모델로서, 이는 우선 생태계내에서 이러한 물질의 이동 경로를 일정구간별로 compartment로 가정하여 이들간의 방사성 물질의 입출력량을 수학적으로 모의한 미분방정식들을 수립하는 것을 기본으로 하는 compartment-based 모델이다. 이들 copmartment사이에 이루어지는 여러 현상들은 주로 firts-order 형태의 속도계수를 사용하고 이러한 값들은 기존 실험에서 얻어진 값이나 또는 여러 수학적 단계 및 전문가 의견등을 고려하여 정량적으로 얻고 있다. 이러한 형태의 모델은 수학적인 미방형태의 식을 사용하므로써 비교적 모델링의 유연성을 갖을 수 있으나 각 현상에 사용한 가정들이 계산을 위해 단순한 모델링을 선호하여 전 구간에 대해 입력인자값들이 일정하게 사용함으로 실제 자연현상들을 제대로 모의하지 못하는 단점이 있다. 이와 달리 둘째는 독일의 ECOSYS 형태의 모델로, 앞서 언급한 compartment-based 모델보다는 보다 간편한 실험식을 사용하여 시간에 따라 변화하는 여러 현상에 관련된 입력인자들을 database화하여 사용하는 모델이다. 이러한 형태의 모델기법은 계산의 간편성이나 활용성에서는 매우 우수하다고 할 수 있으나, 코드내에 사용된 여러 입력변수들이 유럽기후 및 토양특성에 맞도록 20년에 걸쳐 수많은 실험을 통해 구해진 실험식들로 이루어져 있다. 따라서 이를 한국에 맞도록 보완하려면 국내 토양 및 기후에 맞게 많은 실험들이 필요하다는 단점이 있다.

본 연구에서 수행하려는 모델링 형태는 우선 캐나다 및 미국등에서 개발된 PATHWAY나 COMIDA 등의 모델과 같이, 보다 수학적인 compartment-based model을 개발하는 것이 바람직하다는 인식하에 compartment-based 접근방법을 채택하였다. 그러나, 그 동안 국내에서 수행하여 온

실험등에서 얻어진 자료들을 효과적으로 활용할 수 있도록 하기 위해, 시간에 따른 여러 현상에 관련된 입력인자들을 compartment-based modelingcjfja 고정적인 값을 사용하기 보다는 시간에 따라 동적인 값을 사용할 수 있도록 하였다. 이에 따라 앞서 언급한 두 형태를 절충한 방법을 사용한 동적모델 개발을 꾀하려고 한다.

### 2.2 토양및 농작물 모델링

현 모델에서는 토양 및 농작물에서의 방사성물질의 이동을 위해 그림 2에서와 같은 여러 compartment를 고려하였고 각 compartment 사이의 여러 이동 메카니즘을 모델하였다.

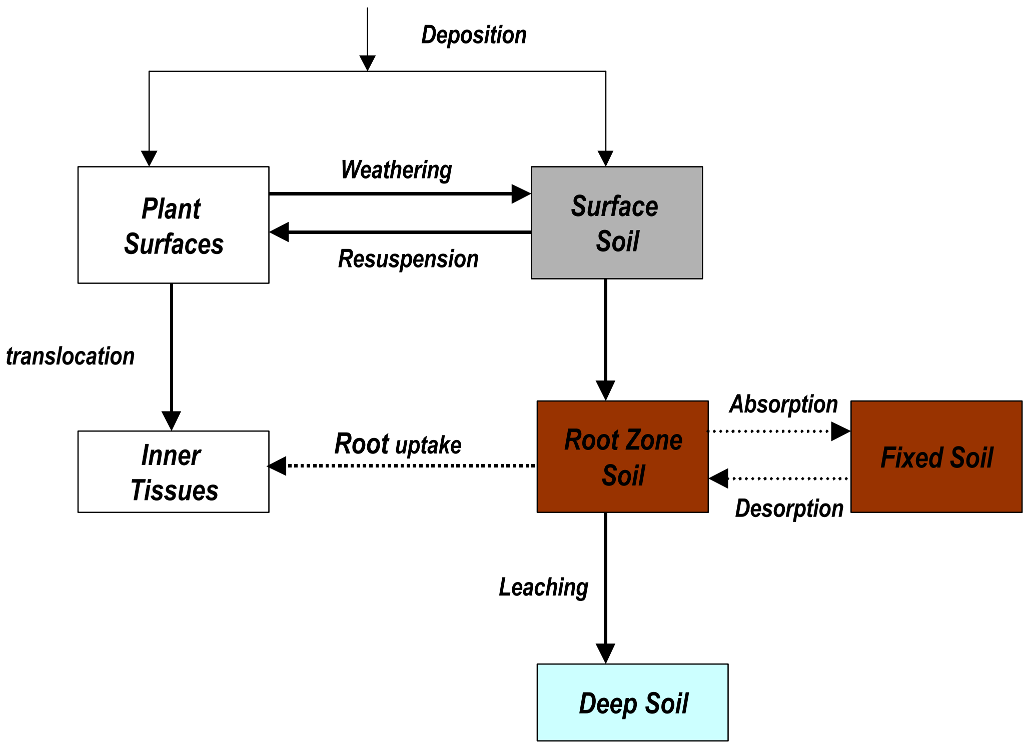



그림 2. 각 compartment사이의 이동 메카니즘

Plant Surfaces ($Q_{ps}$)

작물체표면에서는 재부유현상과 rainsplashing 효과를 고려하였고 weathering, 식용부위로 이동하는 현상을 고려하여 아래와 같이 모델식을 수립하였다.

$$\frac{dQ_{ps}}{dt} = (K_{res} + K_{rs})Q_{ss} - (K_w + K_{Tr} + l_d)Q_{ps} \tag{1}$$

Inner Tissues ($Q_{it}$)

작물체표면에서 이동해온 양과 뿌리에서 흡수된 양 ($R_{up}$)등을 고려하였다.

$$\frac{dQ_{it}}{dt} = K_{Tr}\,Q_{ps} + R_{up} - \lambda_d\,Q_{it} \qquad (2)$$

이때 $R_{up}$ 는 뿌리흡수에 의해 Inner Tissue로 이동된 양을 의미하며 이것은 작물체의 성장속도 ($\frac{dB}{dt}$)와 plant-to-soil concentration ratio (CR)에 관계하는 함수로 나타낼 수 있다.

$$R_{up} = \frac{CR}{X_{rs}\,\rho_{rs}}\frac{dB}{dt}Q_{rs} \qquad (3)$$

여기서 $X_{rs}$ 는 root zone soil의 두께이며 $\rho_{rs}$ 는 bulk density을 의미한다.

Surface Soil ($Q_{ss}$)

여기서는 percolation현상 (토양의 표층부분에서 방사능물질이 root zone 토양으로 아랫쪽 방향으로 움직이는 것) 을 고려하여 이에 대한 속도상수 ($K_{per}$) 를 이용하여 모델링하였다.

$$\frac{dQ_{ss}}{dt} = K_w\,Q_{ps} - (K_{res} + K_{rs} + K_{per} + \lambda_d)\,Q_{ss} \qquad (4)$$

Root Zone Soil ($Q_{rs}$)

방사성물질중 Cs-137 의 경우, root zone 토양과 fixed soil간의 고착현상이 실험적으로 관찰되었다. 이를 모의하기 위해 이 들에 대한 속도상수들 ($K_{ads}$, $K_{des}$)을 사용하였다. 또한 deep soil로 이동하는 leaching 효과도 고려하였다.

$$\frac{dQ_{rs}}{dt} = K_p\,Q_{ss} + K_{des}Q_{fs} - (K_{leach} + K_{ads} + \lambda_d)\,Q_{rs} - R_{up} \qquad (5)$$

Fixed Soil ($Q_{fs}$)

$$\frac{dQ_{fs}}{dt} = K_{ads}\,Q_{rs} - (K_{des} + \lambda_d)\,Q_{fs} \qquad (6)$$

Deep Soil ($Q_{ds}$)

$$\frac{dQ_{ds}}{dt} = K_{leach}\,Q_{rs} - \lambda_d\,Q_{ds} \qquad (7)$$

## 식물성장 모델링과 차단계수

현 모델에서는 biomass의 증가를 다음과 같이 보다 현실적인 성장모델을 사용하였다.

$$B(t) = \frac{B_{\max} B_0}{(B_{\max} - B_0)\, e^{-k_g t} + B_0} \qquad (8)$$

여기서 $k_g$는 성장계수 ($d^{-1}$)을 의미하며, B는 현재 biomass를, $B_{max}$는 최대 biomass, $B_0$는 작물체의 최초 biomass를 의미한다.

따라서 식물성장과 관련되어 식물체 표면에 잔류하는 율을 표시한 차단계수 f은 다음과 같이 과 같이 정의하였다.

$$f = 1 - e^{(-\alpha B_f)} \qquad (9)$$

여기서 $\alpha$는 잎에 의한 차단계수를 의미하고 $B_f$는 biomass를 의미한다.

벼, 배추, 무, 콩 등과 같이 우리나라의 주요작물들에 대한 실험자료를 통해 앞서 언급한 여러 입력인자들을 찾을 수 있으리라 본다.

## 환경제거 (weathering) 계수

여러 모델에서 핵종이나 작물의 종류, 침적후 경과시간에 관계없이 $T_w$ 값으로 14 15 일을 적용하고 있고 COMIDA나 PATHWAY 모델의 경우 iodine에 대해서는 8 9 일을 적용하고 있다. 한편, ECOSYS-87에서는 $T_w$ 값으로 모든 경우에 대해 25 일을 사용하고 있다. 그러나 당 실의 연구결과와 여러 연구자들의 보고를 종합해 볼 때 환경제거상수($K_w$, $d^{-1}$)에 대해서는 다음과 같이 시간 조건에 따라 변화하는 값을 사용하는 것이 보다 현실적일 것으로 판단된다.

| 침적후 경과일수 | Sr | I | 기타 |
|---|---|---|---|
| 0 - 15 | $6.9 \times 10^{-2}$ | $8.7 \times 10^{-2}$ | $5.0 \times 10^{-2}$ |
| 15 - 50 | $2.8 \times 10^{-2}$ | $3.5 \times 10^{-2}$ | $2.5 \times 10^{-2}$ |
| > 50 | $1.4 \times 10^{-2}$ | $1.4 \times 10^{-2}$ | $1.4 \times 10^{-2}$ |

## 뿌리흡수를 통한 가식부로의 이동 (Translocation)

ECOREA에서는 토양과 식물체가 서로 평형상태에 있다고 가정하여 얻어진 이른바 농축계수 (Biolaccumulation factor) 를 이용하여 뿌리이동속도계수를 유도하였다. 이때 농축계수 및 수확량은 수확시점에서의 값을 사용하여  전 성장기간으로 나누었기 때문에 실제론 성장기간동안

가식부로 이동하는 평균속도를 의미하게 된다. 그러나 실제로 국내에서 수행된 실험결과에서는 가식부로 이동하는 현상이 수확기까지의 평균속도로 일정하게 일어나기 보다는 성장기중반에서 보다 많은 이동이 일어나는 것으로 알려져 있다[4]. 그러나 특정 부위로의 전류 정도는 핵종에 따라 크게 차이가 나고 침적시기에 따라서도 변이가 심하므로 핵종이나 침적시기에 적합한 값을 사용해야 할 것이다. 당 연구실에서는 우리나라의 주요작물인 벼, 배추, 무, 콩 등에 대하여 침적시기별로 방사성 Cs, Sr, Ru, Mn, Co 등의 TLF를 확보하고 있으므로 이를 평가모델에서 사용코자 한다.

## 2.3 축산물에 의한 이동경로 모델

오염된 농작물에 의한 축산물 내의 방사성물질의 농도계산은 동물에 의해 섭취되는 농작물의 농도변화와 토양층에 존재하는 방사성물질과 동물의 체내 농도는 평형상태를 유지한다는 가정아래 계산한다. 이러한 계산은 feed-to-animal product transfer coefficient(방사성물질이 동물체내에 들어와 일정시간이 흐른 후 평형상태에 도달했을때 섭취된 양에 대한 특정부위의 존재하는 농도의비를 정의한 계수)로 계산한다. 축산물의 특정부위로의 방사성물질의 이동은 동물 체내의 대사작용(metabolism)에 관여하게 된다. 가장 간단한 모델은 2개의 compartment로 구성된 체내 모델을 이용하는 것이다. 방사성물질은 혈액내에 들어와 우리가 육류로 사용하는 특정부위로 이동하게 된다. 이 과정은 혈액내의 방사성물질이 체내밖으로 배출하는 과정 (Excretion)에 관계하게 된다. 이러한 간단한 2-compartment모델은 여러 분야에서 성공리에 사용되어졌다. 그러나 보다 자세한 체내 과정을 모의하기 위해서는 이 보다는 좀 더 자세한 3-compartment나 그이상의 compartment로 구성된 모델을 사용하는 것이 필요하기도 하다. 일반적으로 포유류에서 여러 compartment를 지닌 식에서의 방사능물질의 농도는 아래와 같이 표현된다.

$$a_j(t) = a_0(0)\sum_{i=0}^{n} K_i e^{-(l+r_i)t} \tag{10}$$

여기서 $l$ 는 붕괴상수, $r_i$ 는 compartment i에서의 생물학적 반감기를 의미한다.

윗식을 단일흡수의 경우 (single intake), 우유에 축적되는 농도를 표현한 식들은 아래표에 정리되어 있다.

$$C(t) = a_1 e^{-b_1 t} + a_2 e^{-b_{21} t} + a_3 e^{-b_3 t} + a_4 e^{-b_4 t} \tag{11}$$

| element | parameter values (for t in days) |
|---|---|
| Cesium | $a_1$ = 3.6x$10^{-3}$ , $b_1$ = 0.69; $a_2$ = 1.5x$10^{-3}$, $b_2$ = 0.17; $a_3$ = 4.0x$10^{-5}$, $b_3$ = 0.023; $a_4$ = -5.1x$10^{-3}$, $b_4$ = 1.84 |
| Iodine | $a_1$ = 9.0x$10^{-3}$ , $b_1$ = 0.88; $a_2$ = 0.98, $b_2$ = 1.15; $a_3$ = 9.0x$10^{-3}$, $b_3$ = 0.102 |

| | |
|---|---|
| Strontium | $a_1$ = 5.5x$10^{-4}$, $b_1$ = 0.48; $a_2$ = 1.0x$10^{-6}$, $b_2$ = 0.017; $a_3$ = -5.5x$10^{-4}$, $b_3$ = 1.58 |

만약 동물에 의한 섭취가 일정하다면 다음과 같은 식을 사용할 수 있다.

$$C_j(t) = \sum_{i=0}^{n} \frac{K_i\, I_{in}}{l + r_i}[1 - e^{-(l + r_i)t}] \qquad (12)$$

윗식은 시간당 일정량 ($I_{in}$)의 방사능 을 계속해서 섭취하였을 때 compartment j 에서의 농도를 계산할 수 있다. 이 식에서 장시간동안 계속된 섭취로 인한 평형상태의 농도는 다음과 같이 표현된다.

$$C_j(Equilibrium) = \lim_{t->\infty} C_j(t) = \sum_{i=0}^{n} \frac{K_i\, I_{in}}{l + r_i} \qquad (13)$$

이식을 단위 섭취량으로 normalize시키면 이것을 이른바 intake-to-food-product transfer factor, $f_m^*$ 라 한다.

$$f_m^* = \frac{C_j(Equilibrium)}{I_{in}} = \sum_{i=0}^{n} \frac{K_i}{l + r_i} \qquad (14)$$

이러한 인자는 intake-to-meat, intake-to-milk, intake-to-egg등에 대해 정리되어 있으며 표 1 에 표시하였다.

표 1. intake-to-food-product transfer factor

| | transfer factor from intake to cow's milk |
|---|---|
| Cs | 7.1x$10^{-3}$ |
| I | 9.9x$10^{-3}$ |
| Sr | 1.4x$10^{-3}$ |

| elements | $f_m$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Beef | Pork | Chicken | Eggs |
| Cs | 2.0x$10^{-3}$ | 3.9x$10^{-2}$ | 1.0x$10^{-2}$ | 5.0x$10^{-3}$ |
| I | 7.2x$10^{-3}$ | | 1.0x$10^{-2}$ | 5.0x$10^{-3}$ |
| Sr | 8.1x$10^{-4}$ | 3.9x$10^{-2}$ | 3.5x$10^{-2}$ | 0.3 |

<u>사료작물내 핵종 농도</u>

목초나 산야초를 제외한 사료작물은 일반 농작물과 같이 취급한다. 목초나 산야초의 경우는 주기적 또는 연속적으로 예취 또는 방목하므로 예취 또는 방목개시 이후에는 장소에 따라 생육밀도가 달라진다. 따라서 직접 오염시 농도나 재부유 농도를 예측할 때에는 일반 농작물과는 다소 다른 방법을 적용해야 한다. 즉, 이른 봄(목초는 3월 1일, 야초는 4월 1일)에서 4월 25일 사이 사고 발생시까지 계속 성장하는 것으로 보고 차단계수와 채취시 단위면적당 생물량을 예측한다. 4월 25일 이후부터 성장종료(10월 25일)까지의 사고에 대해서는 일률적으로 평균 차단계수 (목초지 : 0.4, 야초지 : 0.25 정도로 추정됨)를 사용한다. 목초나 야초에 대해서는 지상부 전체내 농도만 구하면 된다.

<u>가축의 사료섭취</u>

육우는 조사료 대 농후사료의 섭취비로 40 : 60, 유우는 60 : 40 정도가 적당하다. 우리나라에서 소에 공급하는 주조사료는 소수의 농가를 제외하고는 여름에는 청초, 겨울에는 대부분 볏짚에 의존하고 농가에 따라 소량의 건초나 사일리지를 급여하고 있다. 유우의 경우 조사료만 섭취한다면 하루에 50  75 kg의 생초(평균 70 kg으로 봄. 건초로는 17 kg에 해당)를 먹여야 한다. 육우의 경우 이보다 다소 낮은 생초 60 kg, 건초 15 kg 정도가 적당한 것으로 보인다.

돼지와 닭의 주사료는 겨류나 옥수수 종실과 같은 농후사료이다. 1일 농후사료 급여량은 돼지가 2.8 kg, 산란계가 0.11 kg, 육계가 0.08 kg 정도이다. 신선사료는 농후사료의 10%에 해당하는 량을 공급한다. 따라서 무게비로는 농후사료 급여량의 40%가 된다. 돼지에 대한 신선사료로는 무와 무청이 많이 이용되고 닭에 대해서는 엽채류가 많이 이용된다.

문헌 분석 결과를 근거로 우리나라 가축의 년중 사료섭취에 대한 표준 시나리오를 작성하면 표 2 및 3 와 같다.

표 2. 우리나라 소의 사료섭취 표준 시나리오(kg/d)

| 하계(4월25일 10월25일) | | | 동계(4월25일 10월25일) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 사료 | 유우 | 육우 | 사료 | 유우 | 육우 |
| 청초 | 40.8 | 24.0 | 볏집 | 8.2 | 4.8 |
| (목초) | 12.2 | 7.2 | 옥수수일리지* | 6.0 | 3.6 |
| (야초) | 28.6 | 16.8 | 쌀겨 | 4.8 | 6.3 |
| 쌀겨 | 4.8 | 6.3 | 옥수수종실 | 2.0 | 2.7 |
| 옥수수종실 | 2.0 | 2.7 | | | |

* 건초 1kg당 사일리지 3.0kg

표 3. 우리나라 돼지와 닭의 사료섭취 표준 시나리오

| 사료 | 1일 섭취량(kg/d) | | |
|---|---|---|---|
| | 돼지 | 신란계 | 육계 |
| 쌀겨 | 1.40 | 0.055 | 0.040 |
| 옥수수종실 | 0.56 | 0.022 | 0.016 |
| 대두박 | 0.42 | 0.017 | 0.012 |
| 보릿겨 | 0.42 | 0.017 | 0.012 |
| 엽채류* | 0.56 | 0.044 | 0.032 |
| 무 | 0.56 | - | - |

*돼지는 무청, 닭은 배추잎

## 3. ECOREA-II 코드의 입출력부분

기존의 평가코드들은 섭식 경로에 대한 모델을 fortran을 바탕으로 프로그램하여, 사용자가 입출력자료의 handling에 있어서 많은 어려움이 있었다. 개발중인 ECOREA-II 평가코드는 우선 앞서 언급한 섭식경로에 대한 평가모델 자체의 개선과 더불어 사용자들이 보다 쉽게 입력자료를 수정하거나 평가된 결과를 보다 쉽게 볼수 있도록 하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 이를 위해 우선 수학적인 모델식을 프로그램하는데 있어 기존의 fortran보다는 보다 graphic쪽을 강화하기 위해 language를 Visual Basic을 사용하였다. 이 부분에서는 우선 사용자편의를 위한 부분중 입출력 자료의 handling 부분을 개선한 부분을 보여주려고 한다. 현재는 13개의 식품군과 3개의 핵종을 대상으로 프로그램하고 있으나 추후 보다 많은 핵종과 식품을 다룰수 있도록 세분화된 식품종을 추가, 확장과 함께 이에 상응하는 입력자료를 용이하게 보충할 수 있어야 한다. 그리고 중요한 부분은 그동안 compartment-based 모델에서 사용한 시간에 따라 고정된 입력인자를 사용한 것에 반해, 현 모델에서는 그 성격상 각각의 단일식품에 대한 시간 종속적인 입력자료의 변화도 사용자가 고려할 수 있도록 하였다. 나중에 GIS와 연결하여 평가할 수 있도록 식품, 연령, 토양, 핵종 등에 따라 서로 연계되어 있는 입력자료 들을 분류하여 DB화 함으로써, 향후 각 지역의 특성을 반영한 모델을 제공하려고 한다.

구체적으로 ECOREA-II의 개선점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 사용자의 편의를 위한 입출력 개선
  - Visual Program을 사용한 GUI강화
  - RDBMS화를 통한 GIS와의 연계
  - 불확실성분석 등과의 연계를 위한 모듈 개선

● 현실적인 입력변수 조절

- 현실적인 작물 성장 모델 반영
- 시간 종속적인 입력변수 반영

ECOREA-Ⅱ 평가코드는 Visual Basic을 사용하여 5개의 입력창과 1개의 출력창으로 구성하였다. 각 입력창은 사용자의 편의성과 향후 입력자료의 DB화 및 GIS 시스템과 연계 가능하도록 하였다. 각각 입력창에서 자료를 확인 및 수정할 수 있으며, 메인창에서의 파일 입출력을 통하여 전체 입력자료를 향후 구성될 DB와 연계할 수 있도록 하였다.

## 3.1 입출력 조정자료 입력창

그림 3 과 같이 입출력 조정자료 입력창은 섭식경로 평가를 위한 메인 입력창으로서 평가하고자 하는 대상 핵종, 식품군 지정 및 사고일시, 사고시 침적농도, 계산 기간 등의 초기 입력자료 등으로 구성되어 있으며, 이들 자료의 지정을 통하여 초기 평가 모델을 설정하게 된다. 현재 식품군은 13개 종의 농작물과 축산물로 구분되어 있으며, 대상 핵종은 Cs-137, I-131, Sr-90으로 구성되어 있다. 특히, 식품군과 대상 핵종은 향후 추가할 수 있는 모듈을 보강할 예정이다.

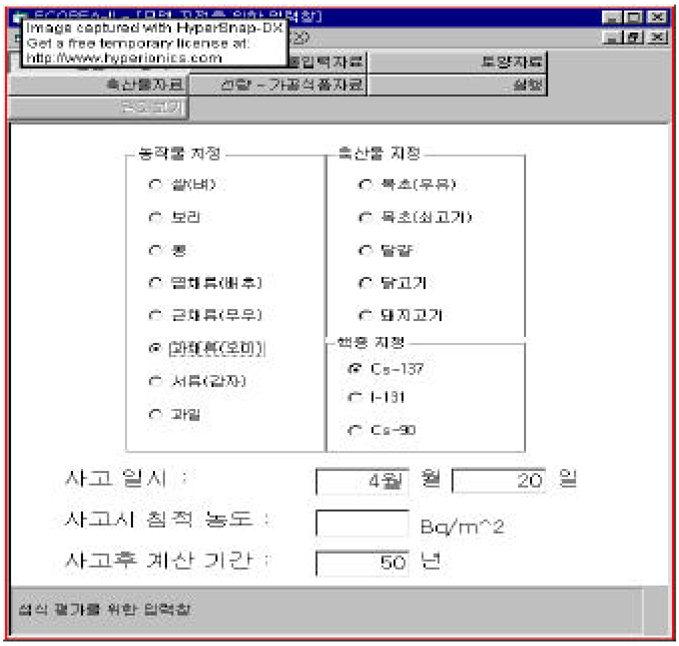
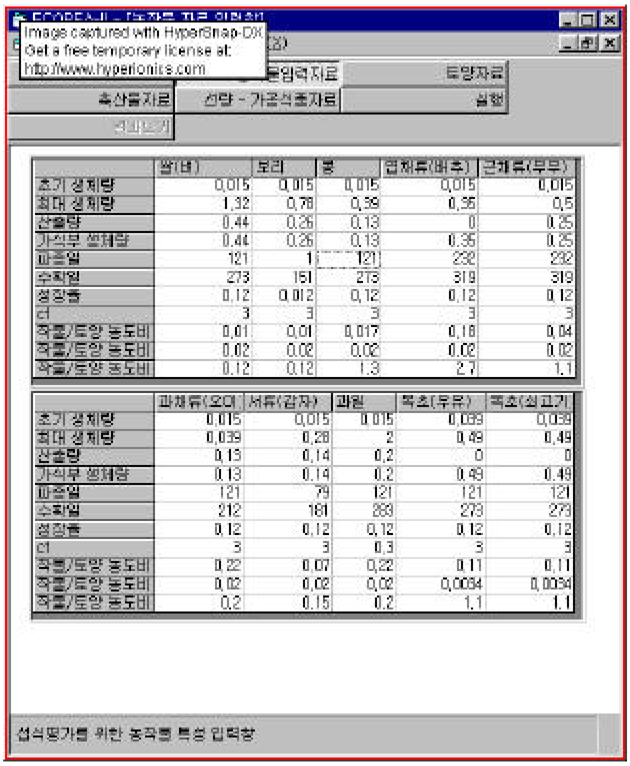



그림 3. 입출력 조정자료 입력창

## 3.2 농작물 입력자료창

농작물 입력자료는 그림 4와 같이 토양에서의 쌀(벼), 보리, 콩, 엽채류(배추), 근채류(무우), 과채류(오이), 서류(감자), 과일, 목초(우유, 쇠고기) 의 9가지의 농작물에 대하여, 단위 면적당 초기 생체량, 최대 생체량, 산출량, 가식부 생체량, 파종일, 수확일, 성장율, 토양 대비 작물의 농도 비

등의 자료를 확인 및 수정할 수 있도록 하였다. 파종일, 수확일 등의 자료는 Julian day로 입력하도록 하였다. 생체량자료는 초기와 최대 생체량, 성장 기간을 통하여 현실적인 성장모델을 반영하였다. 토양 대비 작물의 농도비는 Cs-137, I-131, Sr-90의 순으로 각각의 농작물에 대한 농도비를 나타낸 것이다.




| | 쌀(벼) | 보리 | 콩 | 엽채류(배추) | 근채류(무우) |
|---|---|---|---|---|---|
| 초기 생체량 | 0.015 | 0.015 | 0.015 | 0.015 | 0.015 |
| 최대 생체량 | 1.32 | 0.78 | 0.39 | 0.35 | 0.5 |
| 산출량 | 0.44 | 0.26 | 0.13 | 0 | 0.25 |
| 가식부 생체량 | 0.44 | 0.26 | 0.13 | 0.35 | 0.25 |
| 파종일 | 121 | 1 | 121 | 232 | 232 |
| 수확일 | 273 | 151 | 273 | 319 | 319 |
| 성장률 | 0.12 | 0.012 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| ct | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 작물/토양 농도비 | 0.01 | 0.01 | 0.017 | 0.18 | 0.04 |
| 작물/토양 농도비 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 작물/토양 농도비 | 0.12 | 0.12 | 1.3 | 2.7 | 1.1 |

| | 과채류(오이) | 서류(감자) | 과일 | 목초(우유) | 목초(쇠고기) |
|---|---|---|---|---|---|
| 초기 생체량 | 0.015 | 0.015 | 0.015 | 0.039 | 0.039 |
| 최대 생체량 | 0.039 | 0.28 | 2 | 0.49 | 0.49 |
| 산출량 | 0.13 | 0.14 | 0.2 | 0 | 0 |
| 가식부 생체량 | 0.13 | 0.14 | 0.2 | 0.49 | 0.49 |
| 파종일 | 121 | 79 | 121 | 121 | 121 |
| 수확일 | 212 | 181 | 283 | 273 | 273 |
| 성장률 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| ct | 3 | 3 | 0.3 | 3 | 3 |
| 작물/토양 농도비 | 0.22 | 0.07 | 0.22 | 0.11 | 0.11 |
| 작물/토양 농도비 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.0034 | 0.0034 |
| 작물/토양 농도비 | 0.2 | 0.15 | 0.2 | 1.1 | 1.1 |

그림 4. 농작물 입력자료창

### 3.3 토양자료 입력창

토양 자료 입력창은 그림 5와 같이 경작지별 특성자료와 전체 토양의 특성자료로 구분하여 입력하도록 하였다. 토양은 논, 밭, 목초지로 구분하여 각각 토양의 특성자료를 입력하도록 하였다. 또한 핵종별 토양에서의 분배계수 등의 핵종별 토양 자료도 확인 및 수정할 수 있도록 그림 3와 구현하였다. 토양 특성자료는 농작 토양과 목초지 토양에 대하여 표면토양, root zone 토양, fixed soil, 심층토양으로 구분하여 반영하였으며, 핵종별 토양자료와 함께 핵종별, 토양별 DB화에 중점을 두었다.

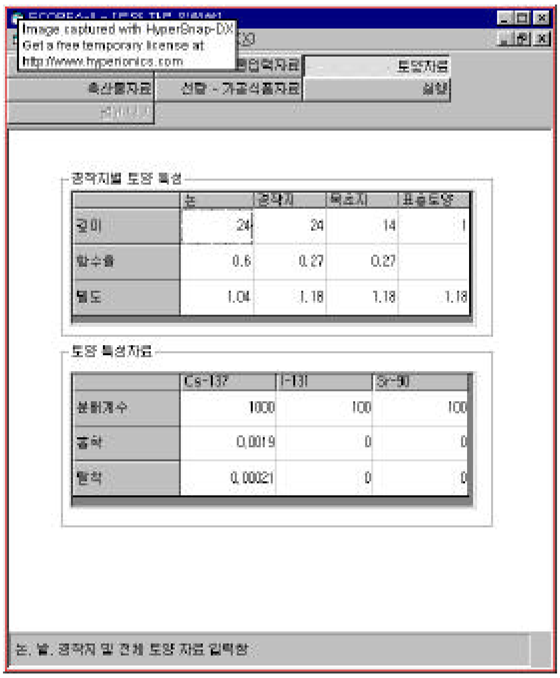


그림 5. 토양자료 입력창

### 3.4 축산물 자료입력창

축산물 자료 입력창은 달걀, 닭고기, 돼지고기, 우유, 젖소, 쇠고기에 대한 핵종별 생물학적 반감기, 생물학적 전이계수에 대한 자료와 돼지고기, 닭고기에 대한 핵종별 섭취량, 목초 섭취량, 토양 섭취량 등에 선량 계산을 위한 목초 및 처리 식품의 자료를 입력하도록 그림 6와 같이 나타내었다. 동물성 식품인 달걀, 쇠고기 돼지고기, 닭고기, 우유 등에 대한 핵종별 반감기와 전이계수는 기존의 ECOREA모델과 같은 값을 사용하였으며, 향후 축산물에 대한 모델 개선과 함께 입출력의 개선도 필요하다. 닭고기, 돼지고기에 대한 핵종별, 목초, 토양 섭취량은 가축이 섭취하는 사료 및 토양에 대한 자료를 의미한다.

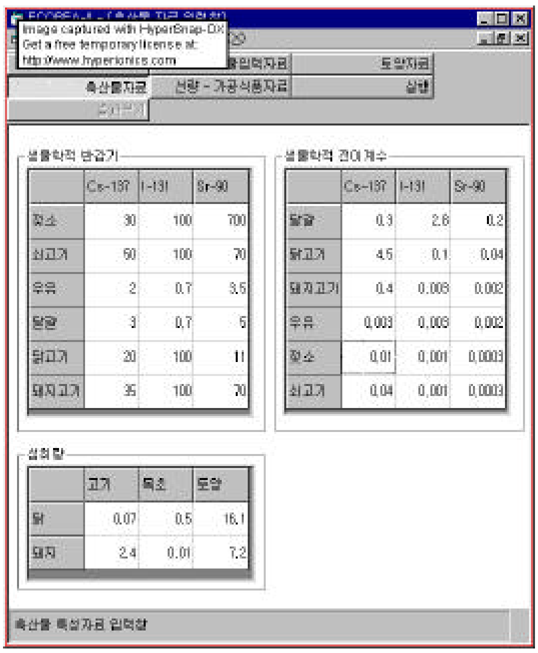


그림 6. 축산물 자료입력창

### 3.5 선량 및 가공식품 자료 입력창

선량 계산 및 가공식품 자료 입력창은 그림 7과 같이 선량계산을 위한 핵종별 선량환산인자 및 식품별 특성자료로서 전체 13개의 대상 식품군 및 3개의 핵종별 자료로 구성되어 있다. Washing Factor, Dry/Fresh 비율, 지연 시간 등의 자료는 선량 계산을 위하여 해당 농축산물을 사람이 섭취하기까지의 과정의 모델링에 필요한 변수들이다. 현재의 자료는 20세 이상의 성인에 대한 전체 소비량을 나타낸 것으로 향후 연령군별 식품소비량을 추가하여 해당 연령에 따른 선량을 구할수 있도록 보강할 예정이다.

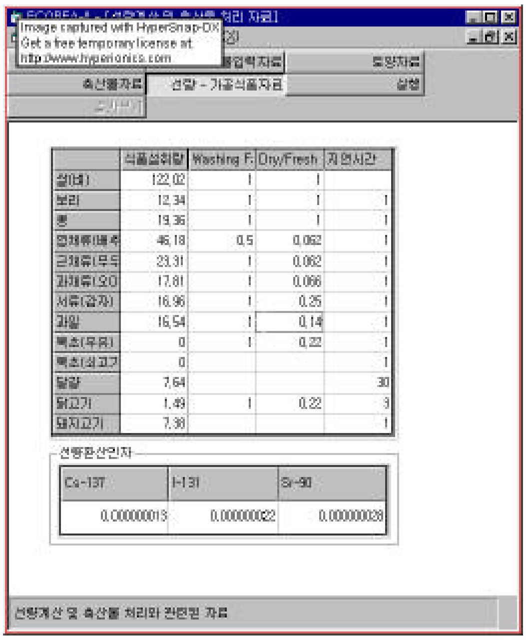



그림 7. 선량 및 가공식품 자료 입력창

### 3.6 결과 출력

앞서 보여준 것과 같이 입력자료의 확인 및 수정은 각 입력창에서 뿐만 아니라 파일 입출력을 통하여 가능하도록 프로그램되었다. 각 창에서 입력한 입력자료들을 바탕으로 각 compartment에서의 핵종농도, 전체선량의 계산을 실행하게 된다. 이렇게 계산결과는 현재 텍스트 파일과 Excel파일로 출력할 수 있도록 하였다

## 4. 요　약

원자력시설의 사고시 환경안전성을 확보하기 위해서는 방출된 방사성물질의 거동분석이 필수적이다. 그동안 이들물질의 인체에 대한 직접노출시 건강영향에 대해서는 비교적 연구가 이루어져 왔으나 오염된 농작물이나 축산물을 통한 섭식경로를 통한 보다 간접적인 노출에

대해서는 관심이 적어왔다. 그러나 이들 경로를 통한 인체노출의 중요성이 대두되면서 한국인이 갖는 독특한 섭식패턴을 고려한 합리적인 환경영향 평가기법 및 대책 수립기술이 마련되어야 할 때이다. 이를 위해 육상 생태계 내에서의 섭식경로를 통한 방사성 핵종의 거동에 대한 연구는 이러한 면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 그 동안 이 분야에서 각종 실험들을 통해 우리나라 실정에 맞는 기초 정보를 양성해 왔고 이러한 노력은 보다 해석적인 평가코드의 개발에 밑걸음이 되리라고 본다. 실험에서는 할 수 없는 다양한 시나리오에 대한 평가, 또 불확실성이 포함한 평가결과 해석을 위해서는 동적 평가코드의 개발 및 활용이 필수적이어서 이 분야에 보다 많은 노력을 기울어져야 할 것으로 사료된다. 본 연구는 이러한 목적으로 보다 사용자가 편리한 interface를 제공하고 한국적인 자료를 통한 이런 분야연구에 이바지 하려고 한다.

## 참고문헌


[1] R.S Booth and S.V. Kaye, "A preliminary Systems Analysis Model of radioactivity Transfer to Man from Deposition in a Terrestrial Environment," NUREG/CR-1196, ORNL, USA, 1980

[2] F.W Whicker and T.B. Kirchner, "PATHWAY: A Dymanic Food Chain Model to Predict Radionuclides Ingestion after Fallout Deposition," Health Physics, 52, 717-737, 1987

[3] 이정호 외, "섭식경로 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭 선량평가 코드 개발," KAERI, KAERI/RR-933/89, 1990

[4] H. Muller and G. Proehl, "ECOSYS-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents," Health Physics, 64 , no.3, 232-252